



Rui Carlos Saúde e Silva

Alimentação em potência de dispositivos sem fios, com
captação de energia de campos eletromagnéticos intensos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José de Almeida Cardoso

Tese apresentada na Universidade de Coimbra como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em
Engenharia Física, ramo de Instrumentação.

Setembro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Alimentação em potência de dispositivos sem
fios, com captação de energia de campos
eletromagnéticos intensos.

Rui Carlos Saúde e Silva

Mestrado Integrado em Engenharia Física

Orientador: Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso

Departamento de Física

Faculdade de Ciências e Tecnologias

Universidade de Coimbra

Setembro de 2017

Agradecimentos:

O meu sincero agradecimento para o professor doutor Francisco José de Almeida Cardoso que me orientou ao longo de toda esta etapa final, bem como ao Pedro Silva e á Joana Faria pela disponibilidade e ajuda prestada. Por fim mas não de menor valor, á minha família mais próxima pelo apoio, quer financeiro quer psicológico, á minha namorada e amigos por toda a motivação e apoio prestado ao longo desta jornada.

Resumo

De forma a satisfazer necessidades de monitorização de ativos de redes elétricas, quer em transporte, quer em distribuição de energia, foi proposto neste projeto uma solução viável para manter o funcionamento de todo o sistema de sensorização e comunicação.

Face a alternativas clássicas, utilizadas atualmente na alimentação de dispositivos sem fios, é colocado em prática um estudo onde são discutidas as suas vantagens e desvantagens. Discussão essa que remete para a utilização de uma nova tecnologia proposta, a utilização de um transformador de corrente *free standing*, ou seja, sem envolver a linha condutora que funciona como primário.

Perante esta alternativa, segue um estudo de viabilidade desta tecnologia, abordando pontos importantes na sua concessão, bem como: forma, dimensões e materiais a usar para a sua concessão.

Segue ainda a proposta de uma tecnologia de armazenamento, discutindo vantagens e desvantagens entre duas concorrentes, condensadores e baterias, sendo proposto o circuito a usar na parte de armazenamento. Circuito esse já usado atualmente, dispensando qualquer estudo preliminar sobre a sua viabilidade.

Abstract

By the challenge to satisfy the needs of electrical infrastructures networks, in transport and distribution, was propose in this Project a viable solution to keep all systems running, like censoring and communication modules.

Taking a look for the classical solutions to power these modules, here was discussed the advantages and disadvantages between our solution and classical solutions.

Our discussion take place in this project by considering a module based in a current transformer. Taking in account that the core can't evolve the primary wire, here was propose a free standing current transformer.

Taking this challenge, we have done a study about the viability of this solution, approaching important parameters, like: shape, dimensions and materials to use in this construction.

After that we propose a storage technology, discussing advantages and disadvantages between two options, battery and super capacitor. Was proposed the surrounding circuit that was already studied dispensing any preliminary study of their viability.

Palavras-chave

Indução; sensorização; ativos elétricos; transformador de corrente; alimentação em potencia; alta-tensão; aproveitamento energético;

Keywords

Induction; sensorial network; electrical infrastructure; current transformer; power supply; high voltage; energy harvesting;

Índice

Capa.....	00
Informações.....	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Palavras-chave/Keywords.....	v
Índice.....	1/2
Índice de figuras.....	3
Índice de Tabelas.....	4
Índice de equações.....	4
Acrónimos.....	5
Introdução (Cap. I).....	6
Motivação e objetivos (1.1).....	6
Abordagem (1.2).....	7
Estrutura (1.3).....	8
Domínio de aplicação (Cap. II).....	9
Âmbito de aplicação (2.1).....	9
Formas de energia disponível (2.2).....	11
Campos eletromagnéticos (2.3).....	12
Metodologia (2.4).....	12
Captação energética (Cap. III).....	13
Princípio de funcionamento (3.1).....	13
Conceção de desenvolvimento do transdutor (3.2).....	16
Materiais (3.2.1).....	16
Projeção esquemática (3.2.2).....	17
Geometria (3.2.3).....	18
Parametrização (3.2.4).....	19
Conclusões (3.3).....	26

Armazenamento (Cap. IV).....	27
Formas de armazenamento (4.1).....	27
Controlador de carga (4.2).....	28
Tecnologia de armazenamento (4.3).....	29
Circuito envolvente (4.3.1).....	29
Estimativa da capacidade do condensador (4.3.2).....	30
Conclusão (Cap. V).....	33
Referências.....	34

Índice de Figuras

Fig. 2.1 – Princípio tecnológico do transdutor.....	10
Fig. 3.1 – Representação das linhas de campo geradas pelo primário.....	14
Fig. 3.2 – Projeção esquemática do mecanismo de captação energética.....	17
Fig. 3.3 – Representação dum núcleo cilíndrico.....	18
Fig. 3.4 – Representação de um núcleo cilíndrico de faces alargadas para melhor captação de campos eletromagnéticos.....	18
Fig. 3.5 – Comparação geométrica entre Fig. 3.3 e Fig. 3.4.....	19
Fig. 3.6 – Comparação de rendimento entre Fig. 3.3 e Fig. 3.4.....	19
Fig. 3.7 – Variação do campo com a distância.....	19
Fig. 3.8 – Variação do campo com a distância.....	20
Fig. 3.9 – Representação do fenómeno de desmagnetização interna.....	22
Fig. 3.10 - Representação de um possível protótipo da tecnologia proposta.....	26
Fig. 4.1 – Representação esquemática do circuito MPPT.....	28
Fig. 4.2 – Representação esquemática do circuito LTC.....	29
Fig. 4.3 – Representação esquemática do circuito TL.....	30
Fig. 4.4 – Representação do circuito de gestão da descarga dos condensadores.....	31

Índice de Tabelas

Tabela T3.1.....	16
Tabela T4.1.....	27

Índice de equações

[Eq 3.1] – Equações de Maxwell.....	13
[Eq 3.2] – Força de Lorentz.....	13
[Eq 3.3] – Lei de Ampère.....	14
[Eq 3.4] – Tensão da função de onda no interior do núcleo.....	21
[Eq 3.5] – Potencia por unidade de volume debitada pelo sistema.....	21
[Eq 3.6] – Relação entre permeabilidade efetiva e permeabilidade relativa.....	22
[Eq 3.7] – Dependência do fator de desmagnetização interna.....	22
[Eq 3.8] – Potencia necessária para alimentar o sistema.....	23
[Eq 3.9] – potência de saída do sistema.....	23
[Eq 3.10] – Relação da geometria com a potencia de saída por unidade de volume.....	24
[Eq 3.11] – Potência de saída em função de parâmetros geométricos.....	24
[Eq 4.1] – Consumo nominal médio de comunicação.....	30
[Eq 4.2] – Consumo nominal médio de aquisição.....	30
[Eq 4.3] – Energia diária necessária para comunicação.....	31
[Eq 4.4] – Energia diária necessária para aquisição.....	31
[Eq 4.5] – Equação que determina a capacidade do condensador necessária.....	32

Acrónimos

MAT – Muito alta tensão

AT – Alta tensão

BT – Baixa tensão

AC – Corrente alternada

DC – Corrente continua

A*L*C – Altura*Largura*Comprimento

TI – Transformador de corrente

MPPT – Maximum power point tracking

I - Introdução

1.1 - Motivação e Objetivos

O transporte e distribuição de energia têm um valor incalculável nos dias de hoje, onde existem vastos quilómetros de cabos que percorrem o planeta. Em muitos casos suspensos em postes, (traçados aéreos) seguros por cadeias de isoladores, noutros por condutas pelo subsolo, (traçados terrestres) levando a caixas de derivação, que conseqüentemente levam a energia elétrica porta a porta.

Com o passar do tempo os isoladores, nos casos dos traçados aéreos, sofrem desgaste devido a humidade, ionização e mesmo depósitos de matérias como dejetos de aves e poeiras. Matérias que levam à formação de uma camada superficial condutora, promovendo o aumento da condutividade do material, perdendo a sua eficiência e até mesmo levando a descargas ao solo através dos mesmos.

No caso de caixas de derivação em traçados subterrâneos, as infiltrações geram aqui também um problema, podendo levar a curto-circuito entre fases. Desta forma, a monitorização destas infraestruturas é essencial para o seu normal funcionamento.

De forma a servir sistemas de aquisição de dados, diagnóstico e comunicação em gestão de ativos de redes elétricas, bem como servir a *industrial internet of things*, foi estudada uma tecnologia que permite a captação energética do meio envolvente. Recorrendo a energia que está a ser dissipada, em forma de campos eletromagnéticos, devido ao transporte em muito alta tensão e distribuição em média/baixa tensão.

Este modo de captação permite desta forma, que toda a rede de dispositivos, de diagnóstico e comunicação, seja alimentada em potência de forma ininterrupta. Sendo de longe a forma mais vantajosa de alimentação face a tecnologias usadas na atualidade.

As soluções existentes não cumprem com vários requisitos. No que toca a alimentação por via de baterias, o custo de substituição das mesmas é muito avultado. Por outro lado, os painéis fotovoltaicos não são viáveis em zonas de elevado tempo de penumbra, onde estes não conseguem produzir energia suficiente para alimentar os dispositivos. Desta forma a tecnologia em estudo onde a sua fonte são os campos eletromagnéticos externos, que se encontram 24/7 (24h por dia, todos os dias da semana) disponíveis, fazem com que esta tecnologia tenha tudo para vingar no mercado.

1.2 - Abordagem

Nesta tese foi abordado o problema dividindo-o em dois casos bem distintos. Num caso temos os traçados aéreos, referentes a alta/muito alta tensão (MAT e AT). Por outro lado tem-se as caixas de derivação subterrâneas, onde se trata de média/baixa tensão (BT).

Em ambos os casos o princípio é o mesmo, o de um transformador de corrente, por outro lado, geometrias e dimensões são completamente diferentes.

Em traçados aéreos, onde a tensão quer em MAT e AT é claramente mais elevada, de forma a não comprometer a segurança da infraestrutura, o sistema deve estar colocado a uma distância superior a 1,5m (distancia de segurança padrão imposta pela REN). Por outro lado, o espaço que o dispositivo ocupa não é muito relevante. Sendo que, este estará colocado ao ar livre, suspenso no poste que suporta os cabos. Neste caso, a variável a ter em especial atenção será a quantidade de matéria-prima necessária na construção do núcleo. Para que, com este seja possível obter a potência necessária à saída do sistema, não só otimizando dimensões, mas também o custo de produção.

Em caixas de derivação subterrâneas, a distância de segurança é claramente inferior, aproximadamente 2cm. Desta forma consegue-se captar linhas de campo mais intensas, fazendo com que as dimensões do núcleo não necessitem de ser tão elevadas. Neste caso de aplicação, outra condição imposta pelo sistema, é o seu dimensionamento. Sendo que, o espaço disponível para implementação, está condicionado a 30x45x10cm (dimensões das caixas).

Assim sendo, os parâmetros de todo o sistema foram levados a estudo nos capítulos subsequentes.

1.3 - Estrutura

À parte deste capítulo introdutório a dissertação seguirá uma estrutura sequencial dividida em mais 4 capítulos.

O **capítulo II** onde é explicada a tecnologia envolvida, bem como o âmbito de aplicação e formas de captação energética.

No **capítulo III** onde é realizada uma análise, qualitativa e quantitativa do sistema de captação, com base nos fundamentos básicos do eletromagnetismo e em estudos já realizados sobre rendimento do mesmo.

O **Capítulo IV** descreve a tecnologia de armazenamento energético que foi usada, bem como foi realizado o controlo de carga para alimentação dos sistemas de sensorização e comunicação.

Por último o **capítulo V** colmata toda uma dissertação com uma apreciação dos resultados obtidos.

II - Domínio de aplicação

2.1 - Âmbito de aplicação

Em ambos os casos já especificados, quer em traçados aéreos em MAT e AT, quer em caixas de derivação subterrâneas BT, este sistema tem uma grande importância.

Os traçados aéreos são normalmente colocados em zonas pouco povoadas, em vales junto a rios. Zonas estas onde a humidade é elevada e o povoamento por aves igualmente elevado, fatores que promovem a degradação dos isoladores.

Em caixas de derivação subterrâneas a humidade penetra com facilidade, levando a que os bornes de aperto mecânico oxidem e promovam a dissipação de energia por efeito de Joule. Levando ao aquecimento dos mesmos nas zonas de resistência por contacto.

Sendo que, por questões regulamentadas de segurança não pode existir acoplamento galvânico, com o objetivo de solucionar estes problemas, promovendo o uso de energias renováveis, é aproveitada energia disponível no meio envolvente. A solução de alimentação dos dispositivos de diagnóstico e comunicação passa por uma tecnologia inovadora tendo como princípio base de funcionamento um transformador de corrente (fig.2.1). Especialmente adaptado para o efeito, visto que numa situação de MAT e AT o núcleo do transformador não poderá, por questões de segurança e custos de produção, envolver a linha que funcionará como primário. Deste modo, a situação aceitável para que não houvesse descargas indesejáveis para o sistema, o raio do toro (núcleo do transformador de corrente) teria de ser de tal forma elevado que iria interferir com as restantes fases.

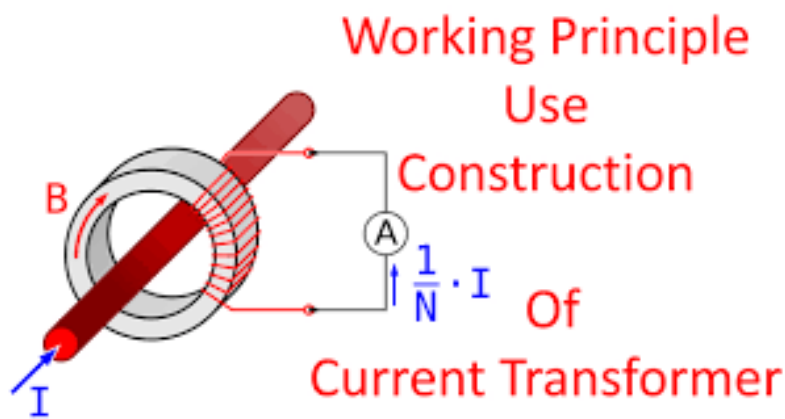


Fig. 2.1: Representação do princípio tecnológico que estará envolvido na nossa tecnologia, adaptada de [1].

Como descrito na figura acima representada, o fio condutor, quer no traçado aéreo, quer no traçado subterrâneo, funcionará como primário onde passa uma corrente (I), com cerca de 300A em corrente alternada (**AC**), produzindo linhas de campo (**B**) circulares, com orientação transversal ao primário. Linhas que penetram o núcleo produzido em material ferromagnético, para melhor confinamento das mesmas, que por sua vez estará enrolado pelo secundário (ou induzido). Gerando, por indução, uma corrente nesse enrolamento (secundário).

Contudo, para que o equipamento tivesse o rendimento desejado, e para que as necessidades energéticas sejam satisfeitas, foi necessário escolher de forma adequada, material, geometria e dimensões do núcleo.

2.2 - Formas de energia disponíveis

As formas de energia disponíveis são diversas em ambos os casos de estudo, em MAT e AT (traçados aéreos) as soluções passariam por painéis fotovoltaicos, quer monocristalinos quer policristalinos, aproveitando energia luminosa. Aerogeradores colocados no topo dos postes, aproveitando energia proveniente de correntes de ar. Transformadores de corrente especialmente adaptados para o efeito, aproveitando os campos magnéticos intensos gerados pelo transporte, ou recorrendo a outras formas de energia não renováveis como por exemplo, baterias.

Por outro lado em BT, nas caixas de derivação subterrâneas, as soluções passam mais uma vez por baterias ou por recurso a transformador de corrente especialmente adaptado para o efeito. Visto que, não poderá envolver os fios condutores presentes nas caixas de derivação.

Assim, e visando fazer frente às soluções já existentes, no que toca a traçados aéreos, onde o recurso a energia solar usando painéis fotovoltaicos tem um custo elevado, e os problemas que levam á queda do rendimento são os mesmos que levam á degradação dos isoladores, o baixo tempo de vida, e em situações de não incidência de luz não haver produção de energia possível. O uso de aerogeradores, onde o princípio de captação passa por elementos móveis, com fácil desgaste. Por outro lado, o uso de baterias onde as despesas de aquisição e manutenção são elevadas. A tecnologia em estudo deixa por terra qualquer concorrência, a corrente que passa nas linhas de forma contínua ao longo do dia, faz com que exista sempre energia envolvente para ser aproveitada.

Em traçados subterrâneos, onde a solução passava por ser uma bateria primária, aqui os problemas diversos seriam: Os custos elevados da sua aquisição, bem como o custo de substituição das mesmas devido ao seu curto tempo de vida. Apesar que, anunciado de cerca de 10anos em situações ótimas, aqui facilmente reduzido devido a variações de temperatura, sendo que, estas dificilmente garantem as suas características acima de 60°C. Por outro lado, a existência de surtos de consumo instantâneo, que levam igualmente á sua degradação e redução do seu tempo de vida, a única alternativa seria a captação de campos eletromagnéticos, com recurso a um transformador de corrente adaptado para o efeito.

2.3 - Campos eletromagnéticos

A tecnologia em estudo tem como base o aproveitamento de energia dissipada para o meio envolvente por campos magnéticos. Atualmente a tecnologia é usada para carregamento sem fios mas a alta frequência, sendo que no nosso caso iremos trabalhar a frequência industrial (50Hz).

Em carregamento de dispositivos por indução, existem duas bobinas, uma primária, e uma secundária que será induzida. A primária é excitada em corrente alternada de elevada frequência para aumento de eficiência no acoplamento com a secundária. Por outro lado, a dielétrica dos materiais depende da frequência, levando a que propagação do campo em altas frequências seja fortemente atenuado, levando a um menor alcance.

Este modo de acoplamento no nosso projeto não é viável, apesar de melhorar o rendimento no acoplamento. Teríamos que ter todo um sistema de osciladores para aumentar a frequência, o que por si, tinham de ser alimentados a AC 50Hz por outro método de captação energética não viável, como explicado no subcapítulo anterior.

2.4 - Metodologia

Este trabalho seguiu uma estrutura por segmentos, começando pelos fundamentos físicos que suportam toda a tecnologia, seguido de um estudo sobre os materiais a usar para o núcleo, geometria e dimensão. Tendo sempre em conta o custo dos materiais de construção bem como a facilidade de montagem, e mantendo sempre o objetivo de satisfação energética requerida pelo sistema.

Por último foi discutida uma opção de armazenamento da energia gerada pelo sistema, bem como o circuito envolvente. Sendo que, já foi testada em estudos prévios e é usada na atualidade, dispensando de testes para as condições do nosso sistema.

III - Captação de Energia

3.1 - Princípio de funcionamento

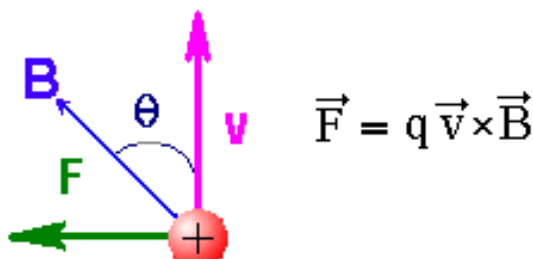
Este projeto é sustentado pelo fenômeno físico de indução eletromagnética, ou de forma mais geral, o magnetismo. A teoria aplicada a indutores magnéticos ou transformadores consiste em relacionar grandezas de campos magnéticos e quantificar a relação entre si.

Fenômenos eletromagnéticos ocorrem quando existe passagem de uma corrente alternada I (AC) num condutor. Fenômenos estes descritos e caracterizados classicamente por Maxwell com as já conhecidas leis de Maxwell (Eq 3.1) em conjunto com a força de Lorenz (Eq 3.2)

(Eq 3.1): *Equações Diferenciais que relacionam o Campo elétrico com o campo Magnético.*

$$\begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = \rho \\ \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \end{array}$$

(Eq 3.2): *Equação que descreve a força a que fica sujeita uma carga em movimento na presença de um campo magnético.*



Aplicando a leis que explicam o princípio físico do magnetismo, podemos justificar o que acontece no nosso sistema. Simplificando toda a teoria desenvolvida por Maxell e reduzindo somente á lei de Ampère (Eq 3.3). Lei que, através do eletromagnetismo clássico nos permite determinar um campo magnético através de uma densidade de corrente elétrica \mathbf{J} , ou de uma corrente elétrica I estacionarias (independentes do tempo).

(Eq 3.3): Equação que descreve o campo gerado por uma corrente I no vazio.

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$$

Com base na primeira equação das equações de Maxwell (Eq 3.1), determinamos que as linhas de campo são como representado na Fig 3.1.

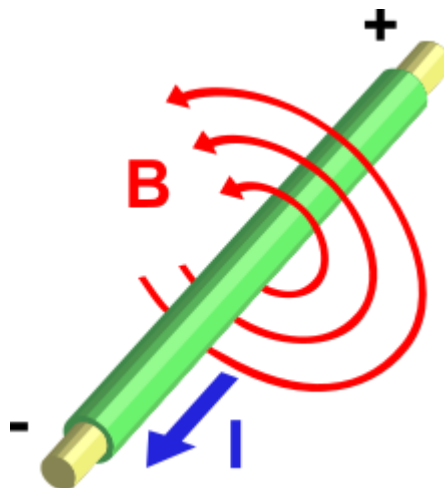


Fig. 3.1: Representação das linhas de campo geradas pelo primário do nosso sistema

Olhando para a figura Fig. 3.1, e para a lei de Ampère (Eq 3.3) podemos deduzir duas coisas:

A primeira é que, para que o nosso sistema funcione, o núcleo tem que ter a orientação do campo magnético. E que, idealmente o núcleo seria um toro que envolveria o primário. Opção não viável, já discutida anteriormente. A solução foi um núcleo que simplesmente é uma porção desse toro, e que estará

colocado de forma perpendicular ao fio condutor que funcionará como primário.

A segunda tem a ver com o material de que deverá ser concebido o núcleo. Sendo que, tendo em conta a lei de Ampère, para que otimizemos o campo no interior do núcleo, ou seja, que seja possível captar o máximo de linhas de campo possível, o núcleo terá que ser construído com um material com elevada permeabilidade magnética.

Por outro lado, é conhecido que da mesma forma que um fio condutor envolto num núcleo, gera um campo magnético, o inverso também se verifica. Um campo que atravesse um núcleo onde esteja enrolado um fio condutor, induz nesse mesmo fio condutor uma corrente.

3.2 - Conceção e desenvolvimento

3.2.1 - Materiais

Como descrito no subcapítulo anterior, pela lei de Ampère o material a usar na conceção do núcleo terá que ter uma elevada permeabilidade magnética. Assim sendo, isso consegue-se recorrendo a materiais ferromagnéticos.

Numa prévia seleção do material a usar, tendo sempre em conta que se trata de um material ferromagnético, foi decidida a estrutura interna do material, tendo em conta a possibilidade de construção. As possibilidades seriam, um núcleo único sólido, ou formado por uma estrutura lamelar.

Desta forma, a escolha foi uma estrutura sólida, pois mantém um rendimento elevado, sendo que a estrutura lamelar melhorava somente na redução das correntes de fuga ao longo do núcleo, mas teria um custo superior na construção.

Depois de escolhida a geometria interna do núcleo, restava ainda a escolha do material do mesmo. Tendo em conta tabelas de permeabilidade magnética e preço dos materiais, sendo que as possibilidades seriam as representadas na tabela a baixo:

	Permeabilidade [H/m]	Permeabilidade relativa	Custo médio Euros [€]
Aço carbónico	$1,26 \times 10^{-4}$	100	0,51/Kg
Ferrite (manganésio, zinco)	$> 8,00 \times 10^{-4}$	> 640	$\sim 1,69/\text{Kg}$
Ferro (99,8 puro)	$6,30 \times 10^{-3}$	5000	97,35 ^{*1}
Ferro	$> 0,36 \times 10^{-4}$	30-800	1.19/Kg

Tabela T3.1: Permeabilidades dos materiais em estudo bem como as permeabilidades relativas dos mesmos.

*¹: preço de uma unidade com $A \cdot L \cdot C = 0.00381 \cdot 1,651 \cdot 0.305\text{m}$

Seguindo materiais apresentados nesta tabela, o material que foi decidido teve em conta a relação entre o custo do material e a sua permeabilidade magnética, descartando á priori o ferro 99.8% puro que devido á sua dificuldade de obtenção tem um custo muito elevado.

3.2.2 - *Projeção esquemática*

Mantendo o raciocínio que foi seguido ao longo deste trabalho, o nosso sistema de captura energética teve como base um transformador de corrente *free standing* (não acoplado), Fig. 3.2.

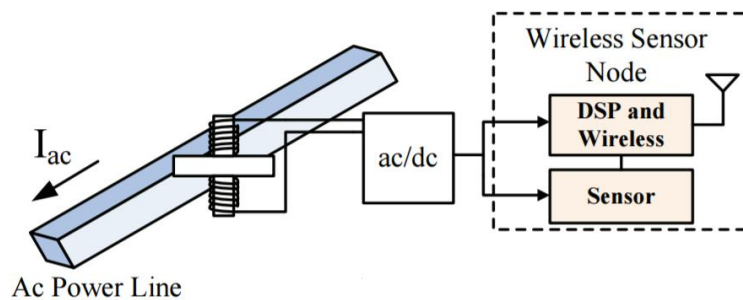


Fig. 3.2: Projeção esquemática do mecanismo de captação energética, adaptado de [10]

Deste modo é possível, sem envolver o fio condutor que funcionará como primário, captar energia dissipada por campos magnéticos para o meio envolvente.

3.2.3 - Geometria

Com base num artigo [3.1] lançado em setembro de 2016, sabemos que podíamos substituir o núcleo do nosso protótipo (fig. 3.3) por um que terá dois concentradores de campo nas extremidades (fig. 3.4). Com raio de captação igual ao que seria de esperar no modelo cilíndrico normal, e uma zona central de raio bastante inferior. Sendo que, desta forma iríamos manter o mesmo rendimento reduzindo a quantidade de matéria-prima a utilizar.

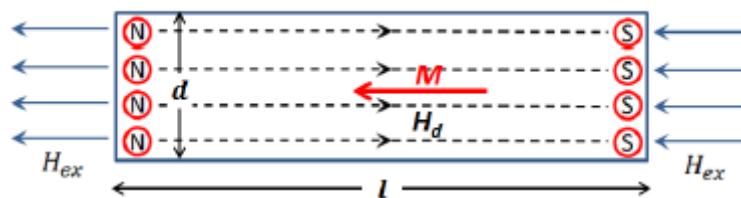


Fig. 3.3: Representação do núcleo cilíndrico, adaptado de [2].

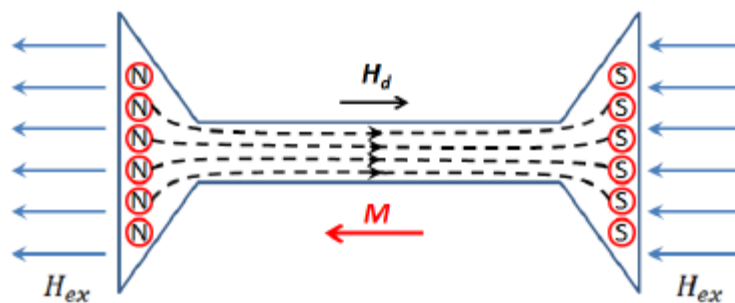


Fig. 3.4: Representação do núcleo cilíndrico com extremidades alargadas para melhor captação de campos, adaptado de [2].

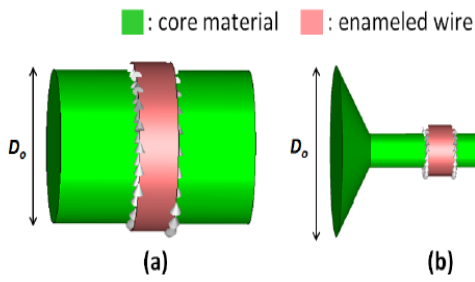


Fig. 3.5: Comparação geométrica, adaptado de [2].

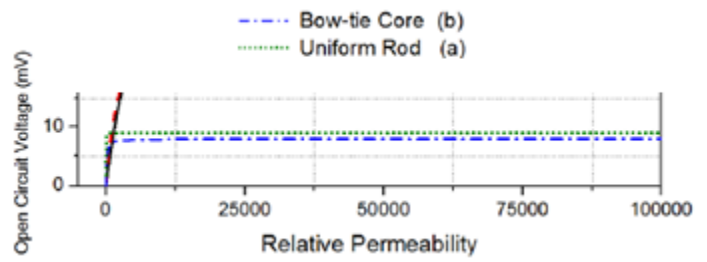


Fig. 3.6: Comparação de rendimento entre (a) e (b), adaptado de [2].

Desta forma, seguindo a geometria (b), consegue-se ter uma poupança drástica no material ferromagnético, bem como espaço livre envolvente. Espaço esse, que pode ser utilizado para colocar toda a eletrónica envolvente ao sistema, mantendo o mesmo rendimento como mostrado na Fig. 3.6.

3.2.4 - Parametrização

Segundo um estudo realizado pela *Elia+* [3], a uma distância de 1,5m o campo magnético tem um valor de aproximadamente $3.5\mu T$ como representado na Fig. 3.7.

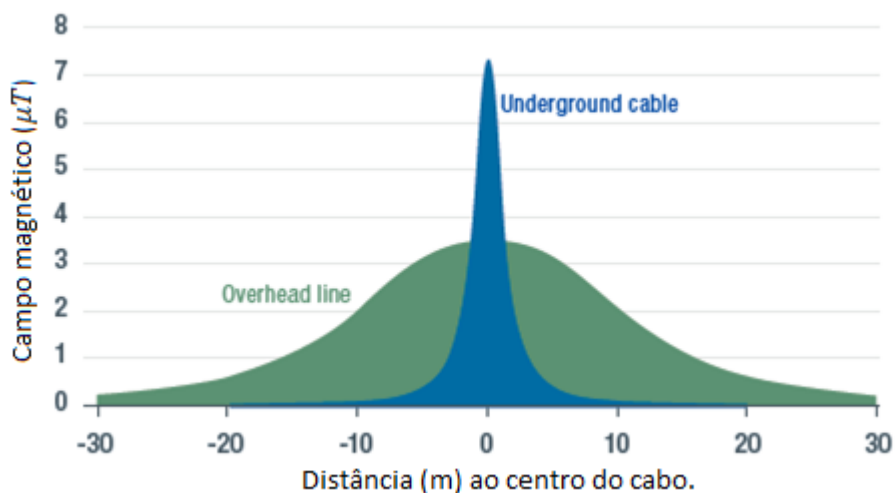


Fig. 3.7: Variação do campo magnético gerado por uma linha AT (150KV), adaptado de [3].

Por outro lado, para distâncias menores podemos obter o seguinte diagrama de intensidade de campos eletromagnéticos [4].

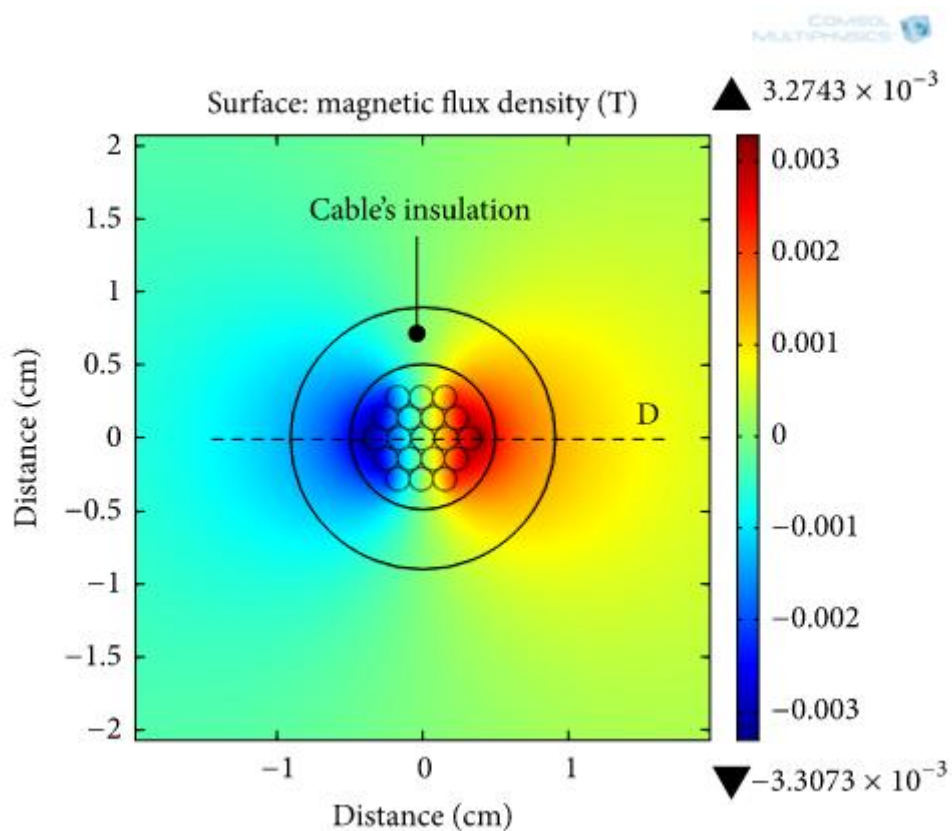


Fig. 3.8: Distribuição das linhas de campo para distancia até 2cm com base no artigo [4]

Nota que, o campo elétrico (V/m) depende da tensão da linha, mas o campo magnético depende somente da corrente (V/m) que passa na linha. Assim, e sabendo que quer em AT, quer MAT a corrente é idêntica (cerca de 100A), pode se estimar que, o campo magnético gerado pelas duas linhas é idêntico.

Com base nos artigos [3] e [4], foi possível estimar que no caso de rede transporte em MAT e AT, as linhas de campo magnético que penetram o núcleo, a uma distância de 1,5m, têm uma intensidade de $3.5\mu T$. Por outro lado, no segundo caso em estudo, distribuição de energia BT, foi possível estimar que as linhas de campo rondam 5mT, para uma distância de 2cm.

Por outro lado, com base no artigo [2], é possível estimar a tensão RMS da tensão AC induzida no enrolamento, pela seguinte fórmula:

$$V_{coil} = N\omega B_{ex} A \mu_{eff} \quad (\text{Eq. 3.4}) \quad (\text{Adaptado de [2]})$$

Onde **V_{coil}** é a tensão AC no enrolamento, **N** o número de espiras, **B_{ex}** a intensidade de campo envolvente ao núcleo, **A** a secção eficaz do núcleo em m^2 , **μ_{eff}** a permeabilidade magnética efetiva do núcleo, e **ω** a frequência angular.

Por outro lado as perdas devido a correntes de eddy, e devido á curva de histerese do material de que é construído o núcleo não podem ser descartadas. Mas, segundo o teorema de transferência máxima de potência, estas perdas podem ser eliminadas, colocando um condensador em série com a bobine que funciona como secundário, e colocando uma resistência **R** que tem que ter a mesma resistência da bobine. Por outro lado, a perdas devido a correntes de eddy podem ser eliminadas usando um núcleo construído de forma lamelar.

Sob estas circunstâncias a potência por unidade de volume pode ser estimada como sendo:

$$S_{power} = \frac{1}{4} \frac{V_{coil}^2}{R_{coil}} / Vol \quad (\text{Eq. 3.5}) \quad (\text{adaptado de [2]})$$

Sendo que **Vol** é o volume do núcleo, e **V_{coil}** e **R_{coil}** estão diretamente relacionadas com a forma do núcleo, material do núcleo, e da bobine envolvente que gera o secundário.

Outro fenômeno físico envolvido é a desmagnetização do núcleo, que leva a que se gere um campo no interior anulando o gerado pelo primário [Fig. 3.9]

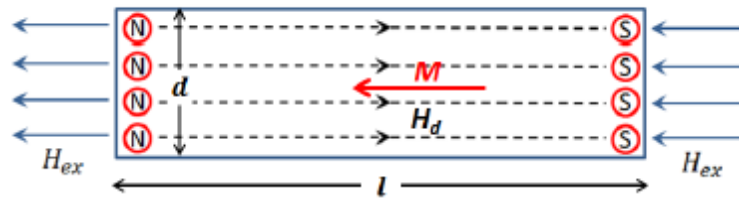


Fig. 3.9: Representação esquemática do fenômeno de desmagnetização interna, adaptado de [2]

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_r}{1 + Dm(\mu_r - 1)} \quad (\text{Eq. 3.6}) \quad (\text{Adaptado de [2]})$$

Este fenômeno leva a que exista uma redução no valor de μ_{eff} pela relação estabelecida em (Eq. 3.6) levando a uma redução drástica no rendimento.

Onde μ_r é a permeabilidade magnética do material e Dm é o fator de desmagnetização que está diretamente ligado à forma do núcleo sendo que a relação estabelecida é dada pela (Eq. 3.7) onde d é o diâmetro da bobine e l o comprimento.

$$Dm \propto \frac{d}{l} \quad (\text{Eq. 3.7}) \quad (\text{Adaptado de [2]})$$

Desta forma, pela (Eq. 3.7) temos que para otimizar o rendimento temos que ter um núcleo como mostrado no subcapítulo 3.2.3. Sendo que, para melhor resultado, diminuindo o efeito gerado pela desmagnetização interna do núcleo, este deve ser de diâmetro reduzido comparativamente com o comprimento.

Sabendo que a energia necessária para satisfazer as necessidades do sistema tem que ser de 3.5J (justificado no Cap. IV), e que o nosso sistema encontra-se a obter energia 24h por dia, a potência que precisamos obter é:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{3.5}{86400} = 0.041\text{mW} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Por simplificação, se $l \gg d \Rightarrow Dm \sim 0$ levando a que $\mu_{eff} \sim \mu_r$. Podendo, com recurso a (Eq. 3.4) e (Eq. 3.5), deduzir a expressão que define a potência de saída em função do volume do núcleo (Eq 3.9).

$$S = \frac{1}{4} \frac{(N*w*Bex*A*\mu_r)^2}{R_{coil}} / Vol \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Sendo que:

$$- R_{coil} = \frac{\rho * L_{fio}}{A_{fio}} = \frac{0,0173 * 2\pi * R * N}{\pi * r^2} = \frac{0,0173 * 2 * R * N}{0,15^2} = 1,54 * R * N$$

Onde:

- ρ : resistividade do fio de cobre.
- L_{fio} : comprimento do fio
- A_{fio} : secção do fio
- r : raio do fio ($r=0.15\text{mm}$)

Obteve-se:

$$- S = \frac{1}{4} \frac{(N*w*Bex*A*\mu_r)^2}{1,54 * R * N} / Vol =$$

$$\Leftrightarrow S = \frac{1}{4} \frac{(w*Bex*A*\mu_r)^2}{1,54 * R} * N / Vol$$

Para os consequentes cálculos fez-se as seguintes considerações:

- 1- **N** – Número de espiras
- 2- **ρ** - Resistividade do fio 0.0173 Ohm.mm²/m
- 3- **A** - Secção eficaz
- 4- **W** =50 Hz (frequência industrial)
- 5- **μ_r** ~ 1000 (ferrite)

$$P = S * Vol = \frac{1}{4} * \frac{(w\mu_r Bex)^2}{1,54 * R} * N * A^2 * Vol \quad (\text{Eq 3.10})$$

Na (Eq. 3.10) obtém-se uma relação que define o rendimento (potencia de saída), em função do numero de espiras (N), tamanho do núcleo (Vol), campo a que este se encontra sujeito (Bex) e secção eficaz (A)

Se aproximarmos o volume do núcleo, como sendo simplesmente o volume da parte interior **$L * \pi R^2$** , excluindo o volume ocupado pelos captadores de campo, e considerando que **A** é a área dos captadores de campo, sendo **$A = \pi * R_{capt}^2$** .

Obtém-se a seguinte relação para a potência gerada pelo sistema:

$$P = \frac{\pi^3 * (w * \mu_r * Bex)^2}{4 * 1,54} * R_{capt}^4 * R * L * N \quad (\text{Eq 3.11})$$

- i) Caso de aplicação para transporte de energia (Bex=3.5μT), MAT e AT:

$$P = 0,154 * R_{capt}^4 * R * L * N$$

- ii) Caso de aplicação para distribuição de energia (Bex=5mT), BT:

$$P = 3,15 * 10^5 * R_{capt}^4 * R * L * N$$

Para satisfazer as necessidades energéticas do sistema, $P=0.041\text{mW}$ temos que para caso:

$$\text{i) } R_{capt}^4 * R * L * N = 2,66 * 10^{-4}$$

Se considerarmos um núcleo com: $L=0,5\text{m}$, $R=2\text{cm}$ e $R_{capt} = 4\text{cm}$

Obtém-se:

$$N = \frac{2,66 * 10^{-4}}{(0,04)^4 (0,02)^2 * 0,5} \Leftrightarrow N = 1,1 * 10^4 \text{ espiras}$$

$$\text{ii) } R_{capt}^4 * R * L * N = 1,30 * 10^{-10}$$

Se considerarmos um núcleo com: $L=3\text{cm}$, $R=0,3\text{cm}$ e $R_{capt} = 0,6\text{cm}$ Obtém-se:

$$N = \frac{1,30 * 10^{-10}}{(0,006)^4 * 0,003 * 0,03} \Leftrightarrow N = 1,12 * 10^3 \text{ espiras}$$

3.3 - Conclusões

Olhando para os valores obtidos anteriormente, podemos tirar várias conclusões. Primeiro, quer para o caso de aplicação i) MAT e AT (Transporte de Energia), quer para o caso de aplicação ii) BT (Distribuição de Energia), as soluções apresentadas são viáveis.

No caso de aplicação i), onde considerámos parâmetros dimensionais com: núcleo de 2cm de raio, 50cm de comprimento, uma secção eficaz de raio 4cm e com a utilização de uma ferrite com permeabilidade relativa de 1000, obteve-se para o número de espiras um valor de 11000. Valor que pode ser facilmente reduzido com o aumento do raio de captação ou qualquer outro parâmetro envolvente.

Para o caso de aplicação ii), com parâmetros dimensionais de: 0,3cm de raio interior do núcleo, 0,6cm o raio dos captadores, 3cm de comprimento e uma ferrite de permeabilidade relativa de 1000, obteve-se que para satisfazer a necessidades impostas pelo sistema o sistema tem que ter 1120 espiras.

Estes valores para número de espiras devem-se crucialmente á potência necessária para satisfazer as necessidades energéticas do sistema. Visto que, o sistema de comunicação é o que consome mais energia, a solução estudada fica ainda mais viável com a utilização de um modem LTE de baixa potencia.

Um esquema possível para a conceção do produto é apresentada na Figura 3.10 abaixo.

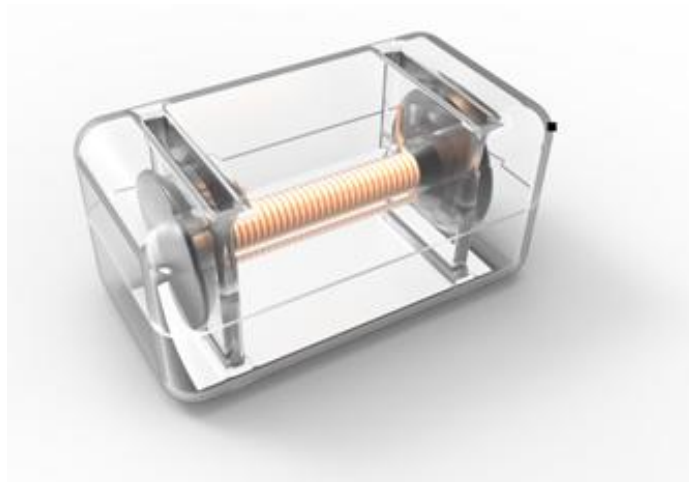


Fig. 3.10: Representação de um possível protótipo da tecnologia proposta.

IV - Armazenamento

4.1 - Formas de armazenamento

Para que tudo funcionasse, e visto que nem tudo funciona eternamente e por vezes as redes elétricas têm de ser cortadas para manutenção, temos sempre que garantir energia no sistema para funcionar pelo menos em duas comunicações. Aviso de corte da rede e aviso de reposição á normalidade.

Desta forma, as soluções em termos de armazenamento energético seriam, ou uma bateria secundária ou um supercondensador. A escolha mais correta para esta solução foi o supercondensador, pois face a concorrente bateria secundaria, o supercondensador tem uma durabilidade superior, consegue armazenar mais energia com um volume de construção menor, e tem um tempo de acomodação mais baixo. Tempo essencialmente importante para situações de descarga, onde a energia precisa de ser debitada de forma imediata. Para além de regimes variados de descarga, trabalho corrente de monitorização e comunicação, temos igualmente variações de temperatura exterior a que as baterias são altamente sensíveis, danificando as suas propriedades.

	Bateria	Supercondensador
Rapidez de resposta* ¹	-	+
Densidade de carga	-	+
Peso	+	+
Dimensão* ²	-	+
Custo* ³	+	+

Tabela T4.1: Tabela qualitativa, comparativa entre vantagens e desvantagens do uso de condensadores e baterias.

Legenda:

*¹: Rapidez de resposta relativamente a surtos de consumo.

*²: Dimensão relativamente à carga necessária para satisfação energética.

*³: Custo de manutenção e produção.

4.2 - Controlador de carga

Dado o facto de a tensão aos terminais dos supercondensadores apresentar uma variação não linear durante o processo de carga ou de descarga, torna-se necessário recorrer a um regulador para garantir uma tensão estável para alimentar sensores, dispositivos de tratamento de dados e comunicação.

Deste modo, e com auxílio a um de um conversor DC-DC podemos desta forma atingir as tensões de -3.3V, +3.3 para interfaces digitais e de -5V, +5V para interfaces analógicas.

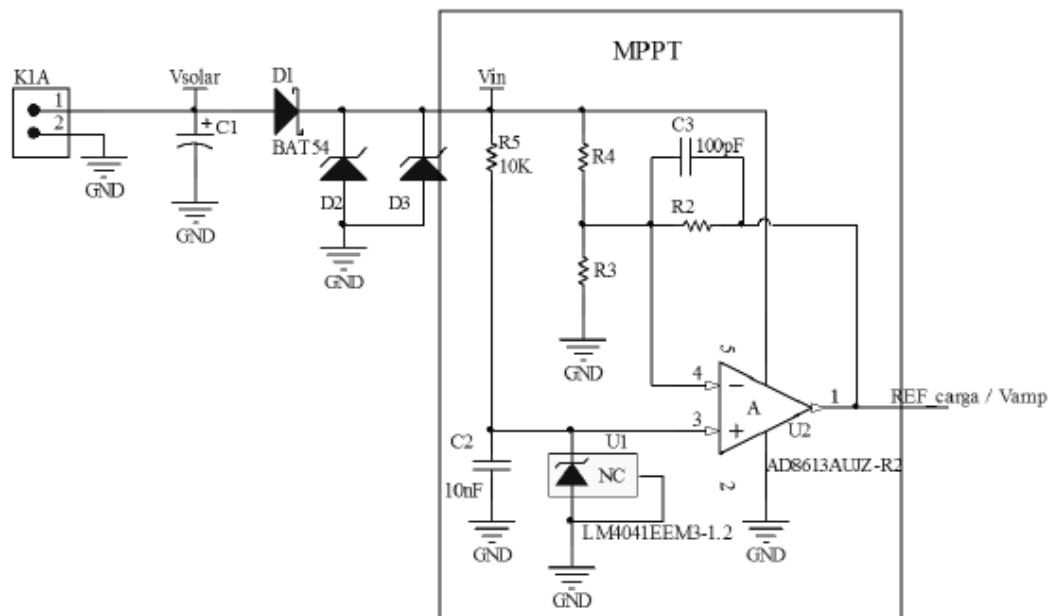


Fig. 4.1 : Representação esquemática do circuito que incorpora o MPPT, adaptado de [11].

O circuito que incorpora o MPPT permite fazer um controlo de carga e descarga com auxílio de um comparador. Uma comunicação de duas vezes por dia será realizada quando o comparador medir, com auxílio a um bobine de Rogowski, uma corrente de fuga com cerca de 20mA.

Este valor ainda se encontra em estudos de laboratório, produzidos no LabLec, onde estudos estão a ser feitos para quando começam a ser críticas as correntes de fuga ao longo dos isoladores.

4.3 - Tecnologia de armazenamento

4.3.1 - Circuito envolvente

Tendo em conta as necessidades sobretudo do modem de comunicação, dispositivo este que tem mais peso em termos de consumos energéticos, visto que quer usando tecnologia GPRS (1min para troca de mensagem, consumo médio: 350mA), ou LTE (10s troca de mensagem, consumo médio nominal: ~100mA), pode ainda o consumo instantâneo atingir 1A em modem GPRS.

Para que não exista qualquer falha na comunicação o sistema de armazenamento tem que estar disposto a debitar a potência necessária, enquanto o modem se inicia e conecta a rede. Desta forma e como dito anteriormente, a tecnologia a usar tem como base um condensador de baixa resistência interna (supercondensador), para que o período de acomodação seja o mais baixo possível e a potência necessária esteja disponível de imediato.

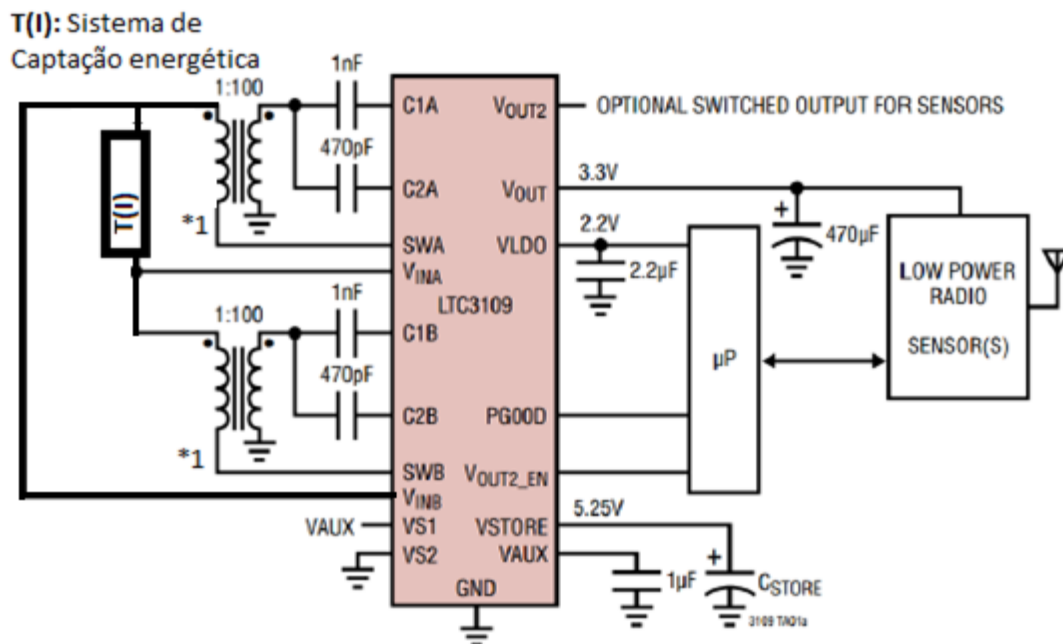


Fig. 4.2: Representação esquemática do circuito que incorpora o LTC bem como os *step up transformers* (*1). Adaptado de [7].

No circuito da figura acima é visível o sistema T(I) que está em representação do subcircuito de captação energética, bem como o circuito de retificação do mesmo (Fig. 4.3). Por outro lado temos também os *step up transformers* (*1) que criam um conversor DC/DC capaz de funcionar independentemente da polaridade e ainda permitindo o funcionamento a muito baixa tensão de entrada.

O circuito LTC tem ainda a capacidade de gerir a carga de vários dispositivos, no nosso caso controla a carga do supercondensador, descrito na figura Fig.4.2 com Cstore.

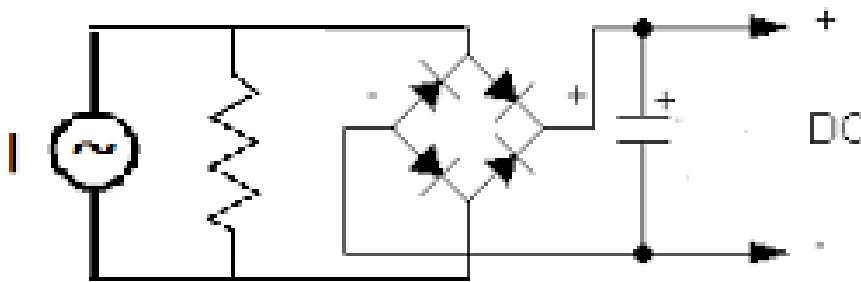


Fig. 4.3: Representação esquemática do circuito TI.

Nota: È de notar que no circuito TI o transdutor está a ser representado pela fonte de corrente alternada.

Estimativa da Capacidade do condensador (4.3.2)

$$\text{Consumo nominal médio de aquisição} = 24\text{mA} \quad , \quad \Delta s = 7\text{ms} \quad (\text{Eq 4.1})$$

$$\text{Consumo nominal medio de comunicação} = 350\text{mA} \quad , \quad \Delta s = 60\text{s} \quad (\text{Eq 4.2})$$

Olhando para os valores acima é de notar que o consumo nominal de aquisição não vai ter relevância. A intensidade de corrente necessária é baixa e a rapidez com que é feito elevada, faz com que a energia envolvente não seja relevante.

Consumo: AH

_ Por comunicação = $350/60 = 5.84\text{mAH}$

_ Por aquisição e tratamento de dados = $24/42000 = 0.57\mu\text{AH}$

Potencia: $W = \text{AH} * \Delta V$

_ Por comunicação = $5.84*5 = 29.20 \text{ mW}$

_ Por aquisição e tratamento de dados = $0.57*3.3 = 1,88\mu\text{W}$

Energia ao longo do dia: $J=W*s$

_ Comunicação (2x por dia) $\Leftrightarrow J = 2*W*s = 2*0.0292*60 = 3.5\text{J}$ (4.3)

_ aquisição/tratamento (96x dia) $\Leftrightarrow 1.88*10^{-6}*96*0.007 = 1.3\text{mJ}$ (4.4)

Nota: Aqui mais uma vez é de notar que a energia gasta ao longo do dia em comunicação é muito superior á gasta em aquisição e tratamento de dados podendo esta ser desprezada.

Assim sendo para estimar a capacidade (**C**) e prevendo que se utilizará dois condensadores em série (Fig. 4.4) com tensão aos terminais de 3.6V:

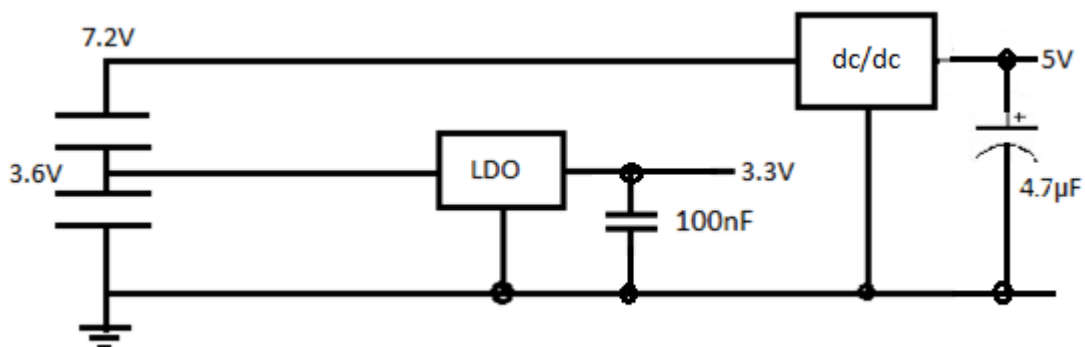


Fig. 4.4: Circuito que representa a gestão de carga á saída dos condensadores.

$$U_{cond} = \frac{1}{2} * C * (\Delta V)^2 \Leftrightarrow C = \frac{3.5*2}{(7.2)^2} \Leftrightarrow C = 0.13F \quad (\text{Eq 4.5})$$

Com base nos cálculos acima realizados, o supercondensador escolhido [1] foi um Panasonic, Ref: [EEC-RG0V105VN](#), com uma capacidade de 1F, custo de 4€ e com uma gama de temperaturas de funcionamento entre -40°C , 85°C.

Sendo que a capacidade equivalente é de 0.5F para a alimentação do modem de comunicação, desta forma temos energia disponível o suficiente em abundancia para que não exista qualquer falha na cominação.

Olhando para o circuito da Fig. 4.4 é de notar duas peças importantes, por um lado a utilização de dois supercondensadores na vez de somente um. Esta opção deve-se á necessidade de obtenção duas tensões diferentes, 3.3V e 5V, assim sendo que desta forma com a utilização de dois reguladores de tensão, um LDO para obter 3.3V aos terminais dum primeiro condensador, onde uma redução somente de 3.6V para 3.3V implica um melhor rendimento energético, e por outro lado tem uma tensão suficiente aos terminais do conjunto para que não exista falha para o modem de comunicação.

Assim da saída do LDO conseguimos tirar 3.3V para alimentar sensores e todo o sistema de tratamento de dados, e na saída do segundo regulador tensão de 5V somente para alimentação do modem de comunicação saídas estas onde estão colocados dois condensadores um cerâmico multicamada à saída do LDO e outro de tantalo polarizado á saída do regulador ambos com o objetivo de abafar qualquer flutuação existente na saída dos reguladores.

Por outro lado, outra situação possível seria a utilização de um DC/DC step down em vez do regulador otimizando o rendimento sendo que atualmente um DC/DC consegue atingir rendimentos superiores a 90%.

V - Conclusão

Ao longo deste trabalho foi feito um estudo sobre tecnologias possíveis para alimentação de dispositivos de monitorização do estado técnico de funcionamento de ativos de redes elétricas e, em particular, de traçados aéreos de MAT e AT e traçados terrestres (subterrâneos) de BT.

Para tal, e nunca descartando outras tecnologias já existentes, mas sim avaliando as suas vantagens e desvantagens relativamente á tecnologia proposta, foi feito um estudo conservador sobre viabilidade de utilização de uma tecnologia que permite a captação de campos eletromagnéticos com base no princípio de funcionamento de um transformador de corrente *free standing*.

Desta forma, e sempre com o intuito de otimização de rendimento e redução de custos de produção e manutenção, foi feito um estudo de materiais a utilizar, de geometria (forma e dimensões), e de tecnologia para armazenamento de energia que respeitassem as condições de segurança requeridas em cada caso, sendo que não é possível o acoplamento galvânico com nenhum dos cabos condutores.

Perante condições fronteira propostas, os dados obtidos tiveram o impacto de considerarmos a tecnologia viável, sendo que segundo um estudo conservador relativo a condições de segurança elétrica e viabilidade económica, a tecnologia é viável. Assim, em traçados aéreos foi considerada uma distância de segurança em relação aos condutores de no mínimo 1,5m (em AT esta distância pode ser inferior, aumentando a intensidade de campo magnético e, desse modo otimizando o rendimento de conversão), e em caixas de derivação de traçados subterrâneos de BT onde foi considerada uma distância de segurança de 2cm.

Estas distâncias de segurança foram regulamentadas pelas entidades interessadas no projeto, bem como: REN e a EDP.

Estas soluções não dispensam a verificação e demonstração em condições reais sendo que estas dependem de condições laboratoriais na LabLec por parte das empresas envolvidas, Eneida Wireless & Sensors S.a e REN ainda não disponíveis, mas já programados para um futuro próximo.

Referências

- [1] Electronics Tutorials. The Current Transformer - página online
- [2] Yuan S, Huang Y, Xu Q, Song C (setembro de 2016). A High Efficiency Helical Core for Magnetic Field, Energy Harvesting – Artigo - *in* IEEE Transactions on Power Electronics
- [3] Elia+ (outubro 2010). Electric and Magnetic fields - Artigo
- [4] Khan FU (junho 2016). Energy Harvesting from the Stray Electromagnetic Field around the Electrical Power Cable for Smart Grid Applications – Artigo
- [5] Tashiro K, Wakiwaka H, Inoue S, Uchiyama Y (outubro 2011). Energy Harvesting of Magnetic Power-Line Noise – Artigo - *in* IEEE Transactions on Magnetics
- [6] pt.mouser.com – Site online
- [7] Linear Technology (2010). Auto-Polarity, Ultra low step-up converter and power manager - LTC3109 datasheet
- [8] Lima M (2012). http://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/4320292_2012/cap7.pdf,
acedido em julho 2017
- [9] Kocoloski M, Eger C, Mccarty R, Hallinan K, Kissock k (2007). Industrial Solid-State Energy Harvesting: Mechanisms and Examples – livro
- [10] Faria J (2014). Monitorização e Diagnóstico Automático de Purgadores em Linhas de Vapor Industriais através de Sensores Inteligentes Sem Fios - Tese
- [11] Semedo S (2015). Gestão de energia em redes de sensores sem fios - Tese
- [12] Paula A (2008). As equações de maxwell e aplicações - Livro
- [13] How2Power T (2017). Ferrite Core Magnetics - Artigo